



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H05B 6/04 (2021.01)

(21)(22) Заявка: 2020109347, 03.03.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
03.03.2020

Дата регистрации:  
29.03.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.03.2020

(45) Опубликовано: 29.03.2021 Бюл. № 10

Адрес для переписки:

620002, Свердловская обл., г. Екатеринбург, ул.  
Мира, 19, ФГАОУ ВО "УФУ", Центр  
интеллектуальной собственности, Маркс Т.В.

(72) Автор(ы):

Камаев Дмитрий Алексеевич (RU),  
Лузгин Владислав Игоревич (RU),  
Фризен Василий Эдуардович (RU),  
Коптяков Александр Сергеевич (RU),  
Петров Александр Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования "Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2405286 C1, 27.11.2010. RU  
2312450 C2, 10.12.2007. RU 113104 U1, 27.01.2012.  
US 4692855 A, 08.09.1987.

(54) Установка двухчастотной индукционной плавки металлов

(57) Реферат:

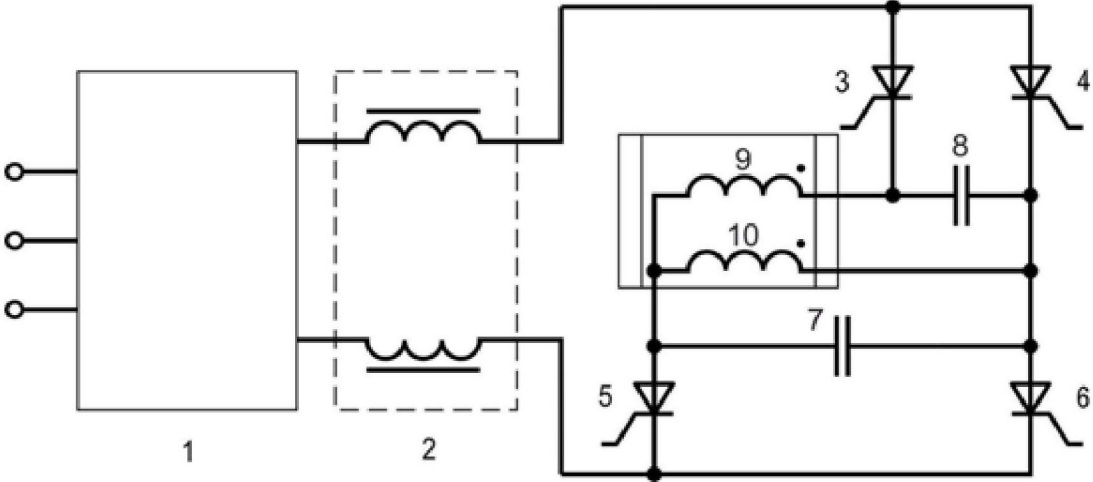
Предлагаемая полезная модель установка двухчастотной индукционной плавки относится к области электротехники и металлургии, а именно к системам электропитания плавильных печей для производства металлов и сплавов черных и цветных металлов.

Установка состоит из индукционной печи с однофазным индуктором, зашунтированным компенсирующим конденсатором, преобразователя частоты с инвертором тока, содержащим тиристоры анодной и катодной групп, соединенные по схеме однофазного моста. Новым является то, что инвертор тока снабжен дополнительным компенсирующим конденсатором, а индуктор печи выполнен из двух секций, имеющих правую и левую намотки, соединенные последовательно, причем дополнительный компенсирующий конденсатор одним выводом соединен с одной из секций индуктора, а вторым выводом подключен ко второй секции индуктора, зашунтированной

компенсирующим конденсатором, к выводам которого подключены тиристоры катодной группы моста, а тиристоры анодной группы моста подключены к выводам дополнительного компенсирующего конденсатора.

Предполагаемая установка позволяет одновременно формировать в секциях индуктора токи низкой и высокой частот, а соотношение их уровней регулируется изменением частоты управления инвертора. На этапе разогрева и плавки шихты наиболее эффективен режим электропитания на высокой частоте, а на этапе технологической обработки расплава металла целесообразно поддерживать наибольший уровень низкочастотной составляющей тока в секциях индуктора, при котором обеспечивается наиболее интенсивное перемешивание металла и одноконтурная циркуляция расплава в рабочем объеме печи. Управление режимами электропитания позволяет расширить функциональные возможности индукционных

печей, повысить эффективность индукционной плавки и улучшить качество получаемых сплавов.



Фиг. 1

RU 203248 U1

RU 203248 U1

Предлагаемая полезная модель относится к области электротехники и металлургии, а именно к оборудованию для индукционной плавки металлов. Индукционные тигельные печи (ИТП) имеют достаточно высокий КПД по сравнению с другими электроплавильными установками. Питание ИТП может осуществляться от разных источников, в том числе – от печных трансформаторов промышленной частоты, полупроводниковых преобразователей. На технологический процесс плавки в ИТП существенно влияет скорость движения расплава и характер циркуляции потоков металла. При однофазном питании индуктора расплав циркулирует по двум тороидальным контурам, обусловленным наличием нормального сжимающего электродинамического давления, неравномерно распределенного магнитного поля по высоте, достигающего максимального значения в средней части тигля. Такое силовое воздействие на металл приводит также к образованию мениска (выпуклости на поверхности расплава). Все эти процессы негативно влияют на процесс плавки, в частности, плохо смешиваемые контуры циркуляции расплава приводят к неоднородности химического состава сплава и к неравномерности распределения температуры в расплаве, а мениск приводит к переохлаждению поверхности и к необходимости использования большого количества защитного шлака.

В ИТП с многофазным индуктором обеспечивается одноконтурная циркуляция металла по всему рабочему объему печи под действием бегущего магнитного поля, создаваемого секциями индуктора, питание которых осуществляется от многофазного источника питания (см. Л1. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Энергия, 1967 – рис 11-4, Приложение 1). Эффективность перемешивания металла возрастает при снижении частоты тока, а эффективность индукционного нагрева металла возрастает при ее повышении, следовательно, наиболее эффективным процесс плавки и перемешивания металла будет достигаться при одновременном формировании токов низкой и высокой частоты в секциях индуктора.

В установках индукционной плавки в качестве источника питания индукционной печи широко используются тиристорные преобразователи частоты на основе параллельного инвертора тока. В таких установках инвертор тока формирует однофазное одночастотное напряжение на индукторе печи, что не позволяет осуществить электропитание индуктора токами разной частоты.

Таким образом, предполагаемая полезная модель помогает решить проблемы, связанные с неоднородностью химического состава сплава и с неравномерностью распределения температуры в расплаве, а так же с использованием большого количества защитного шлака.

Технический результат полезной модели заключается в том, что расширяются функциональные возможности индукционных печей и повышается эффективность индукционной плавки металлов. Сущность предлагаемой полезной модели состоит в следующем. В установке двухчастотной индукционной плавки металлов инвертор тока для проведения технологического процесса плавки при воздействии токов низкой и высокой частоты в индукторе содержит тиристоры анодной и катодной группы, соединенные по схеме однофазного моста, к зажимам переменного тока которого подключен индуктор печи, зашунтированный компенсирующим конденсатором, а зажимы постоянного тока моста подключены к источнику постоянного напряжения через фильтровые дроссели.

Новым является то, что в установку введен дополнительный компенсирующий конденсатор. Индуктор печи выполнен из двух секций, имеющих правую и левую намотки, соединенных последовательно между собой. Причем дополнительный

компенсирующий конденсатор одним выводом соединен с одной из секций индуктора, а вторым выводом подключен ко второй секции индуктора, зашунтированной компенсирующим конденсатором, к выводам которого подключены тиристоры катодной группы моста, а тиристоры анодной группы моста подключены к выводам дополнительного компенсирующего конденсатора.

Общеизвестным является установка для формирования двухчастотного тока индуктора при суммировании выходных параметров двух преобразователей частоты, синтезирующих разные частоты (Schwenk, патент WO 1991/015935). Для создания двухчастотного тока в индукторе используется два последовательных резонансных инвертора, подключенных к одному индуктору. Недостатком является необходимость применения мощного высокочастотного фильтрового дросселя в цепи низкочастотного инвертора для исключения протекания высокочастотного тока, а также снижение эффективности установленного оборудования преобразователя частоты с инвертором напряжения при питании мощных ИТП.

Существует установка для формирования двухчастотного тока построенная на базе одного преобразователя частоты с одним квазирезонансным инвертором, который поочередно генерирует две разные выходные частоты на первой и третьей гармониках выходного тока (Shizumasa Okudaira, Kouki Matsuse: Dual frequency output quasi-resonant inverter for induction heating. T.IEE, vol.121-D, No5, 2001, p.564, fig. 1). Регулирование выходного тока инвертора производится за счет закорачивания набора резонансных конденсаторов. Инвертор содержит большое количество силовых полупроводниковых элементов и его использование оказывается нецелесообразным при питании энергоемких ИТП.

Наиболее близким по технической сущности к заявленной полезной модели является установка для индукционной одночастотной плавки, содержащая преобразователь частоты с параллельным инвертором тока и ИТП стандартной конструкции (см. Л2. Информационный каталог фирмы ABP «THERISTOR CONVERTER WITH PARALLEL-RESONANT CIRCUIT» [www.abpinduction.com](http://www.abpinduction.com)), которая выбрана в качестве прототипа.

Таким образом, заявленный технический результат – расширение функциональных возможностей индукционных печей и повышение эффективности индукционной плавки металлов – достигается с использованием в установке двухчастотной индукционной плавки металлов в качестве источника питания двухчастотного инвертора тока, который возбуждает колебательные контуры печи и вызывает одновременное протекание токов низкой и кратной ей высокой частоты в секциях индуктора, что обеспечивает эффективный нагрев, плавку шихты и активное перемешивание жидкого расплава по всему рабочему объему тигля печи.

На фиг. 1 приведена схема двухчастотного инвертора тока, в которой обозначено: 1 – источник постоянного напряжения; 2 – фильтровые дроссели; 3, 4 – тиристоры анодной группы; 5, 6 – тиристоры катодной группы; 7 – компенсирующий конденсатор; 8 – дополнительный компенсирующий конденсатор; 9, 10 – секции индуктора печи.

При таком соединении секций индуктора и компенсирующих конденсаторов образуется два резонансных контура. Первый – низкочастотный – образован дополнительным компенсирующим конденсатором 8 и последовательно включенными секциями индуктора 9 и 10, а второй – высокочастотный – образован компенсирующим конденсатором 7 и секциями индуктора 5 и 6. Поскольку емкость конденсатора 8 значительно больше, чем емкость конденсатора 7, то собственная частота высокочастотного контура определяется индуктивностью параллельно соединенных секций индуктора, а собственная частота низкочастотного контура обусловлена

индуктивностью последовательно соединенных секций индуктора. Протекающий по секциям индуктора высокочастотный ток направлен по обмоткам встречно, но поскольку обмотки имеют правую и левую намотку, то магнитное поле, создаваемое ими в рабочем объеме печи, будет иметь одинаковое направление, что способствует  
 5 повышению эффективности нагрева и плавки шихты. Ток низкой частоты протекает по обмоткам в одну и ту же сторону, но при разном направлении намотки обмоток поле, создаваемое током низкой частоты, будет направлено встречно, что приводит к ослаблению результирующего поля в средней части рабочего объема печи и способствует созданию одноконтурной циркуляции металла по всему объему печи. Одноконтурная  
 10 циркуляция металла и активное его перемешивание позволяет быстро выравнивать температуру расплава и обеспечивать высокую точность химического состава сплава при его легировании и технологической обработке.

Низкочастотный каскад инвертора, образованный тиристорами 3 и 4, при подаче импульсов управления работает на частоте близкой к резонансной частоте  
 15 низкочастотного контура нагрузки. Высокочастотный каскад инвертора, образованный тиристорами 5 и 6, при подаче импульсов управления на кратной частоте по отношению к частоте низкочастотного каскада, формирует ток подпитки высокочастотного контура нагрузки. Таким образом, каскады инвертора работают на разных частотах отличающихся, например, ровно в три раза и возбуждают нагрузочный контур на  
 20 основной гармонике и на третьей гармонической составляющей. В секциях индуктора протекает суммарный ток низкой и высокой частоты. Соотношение уровней токов низкой и высокой частоты зависит от степени отстройки частоты управления каскадами инвертора, от собственных частот низкочастотного и высокочастотного нагрузочных контуров. Следовательно, регулирование отношения высокочастотного и  
 25 низкочастотного тока в секциях индуктора печи достигается изменением частоты управления инвертора и может быть установлено на требуемом уровне, соответствующей стадии плавки металла. На этапе разогрева и плавки шихты наиболее эффективен режим электропитания на высокой частоте, а на этапе технологической обработки расплава металла целесообразно поддерживать наибольший уровень  
 30 низкочастотной составляющей тока в секциях индукторов, когда обеспечивается наиболее интенсивное перемешивание металла по всему рабочему объему печи.

На фиг. 2 приведены диаграммы работы двухкаскадного инвертора тока. На тиристоры низкочастотного каскада подаются импульсы управления  $i_{y3,4}$  (см. фиг. 2, а), а на тиристоры высокочастотного каскада –  $i_{y5,6}$  (см. фиг. 2, б). Низкочастотный  
 35 каскад формирует ток  $I_{ин}$  прямоугольной формы (см. фиг. 2, в), который содержит основную гармонику  $I_{(1)ин}$  и третью гармонику  $I_{(3)ин}$ . На конденсаторе 8 формируется напряжение низкой частоты  $U_{Снч}$  и напряжение утроенной частоты  $U_{Снв}$ , которые сдвинуты по отношению к гармоническим составляющим выходного тока  
 40 соответственно на углы  $\beta_n$  и  $\beta_3$ . Суммарное напряжение  $U_{Сн}$  на низкочастотном конденсаторе 8 (см. фиг. 2, з) определяет напряжение на тиристорах низкочастотного каскада 3 и 4  $U_{vн}$ , диаграмма которого показана на фиг. 2, г. Условия коммутации тириستоров обеспечиваются наличием обратного напряжения в момент коммутации и  
 45 углом восстановления  $\vartheta_n$ , величина которого определяется режимом работы высокочастотного каскада.

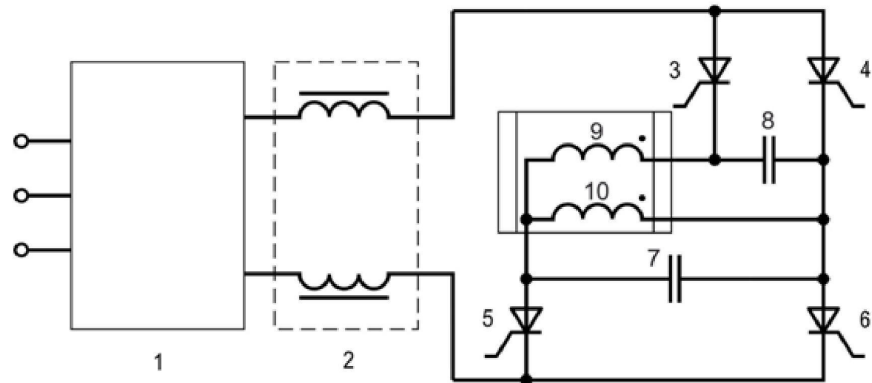
Высокочастотный каскад формирует выходной ток прямоугольной формы утроенной частоты  $I_{ив}$  (см. фиг. 2, д), основная гармоника которого  $I_{(1)ив}$  и напряжение на

высокочастотном конденсаторе  $7 U_{C_{вч}}$ , сдвинутое по фазе на угол  $\beta_{в}$ , определяют мощность высокочастотного каскада. По высокочастотному конденсатору протекает часть низкочастотного тока, которая определяет низкочастотную составляющую напряжения  $U_{C_{вн}}$ . Суммарное напряжение высокой и низкой частоты на  
 5 высокочастотном конденсаторе  $7$  (см. фиг. 2, и) определяет напряжение на тиристорах высокочастотного каскада  $U_{вв}$ , диаграмма которого приведена на фиг. 2, ж. Условия коммутации тириستоров высокочастотного каскада обусловлены наличием обратного напряжения в момент коммутации и углом восстановления тиристоров  $\vartheta_{в}$ , величина  
 10 которого определяется соотношением напряжения высокой и низкой частоты.

#### (57) Формула полезной модели

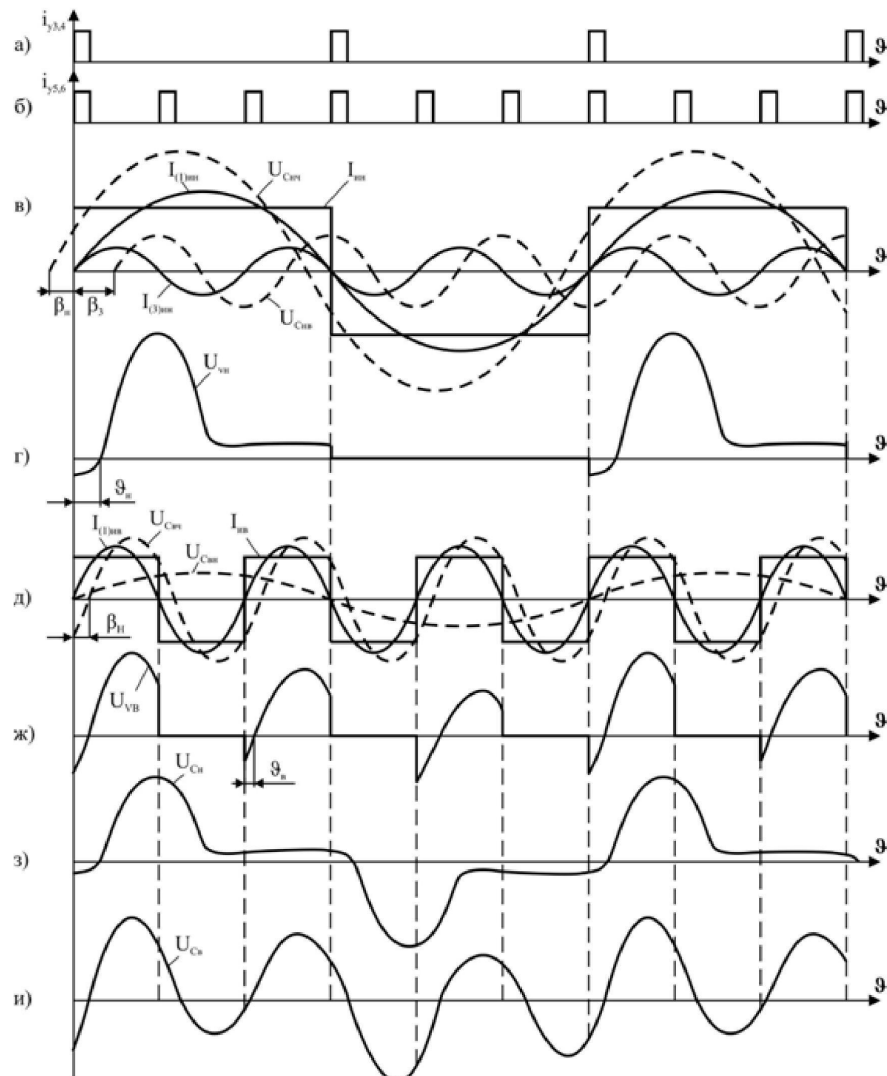
Установка двухчастотной индукционной плавки металлов, состоящая из индукционной печи с однофазным индуктором, зашунтированным компенсирующим  
 15 конденсатором, преобразователя частоты с инвертором тока, содержащим тиристоры анодной и катодной групп, соединенные по схеме однофазного моста, к зажимам переменного тока которого подключен индуктор печи, а зажимы постоянного тока моста подключены через фильтровый дроссель к источнику постоянного напряжения, отличающаяся тем, что дополнительно введен компенсирующий конденсатор, а  
 20 индуктор печи выполнен из двух секций, имеющих правую и левую намотки и соединенных последовательно между собой, причем дополнительный компенсирующий конденсатор одним выводом соединен последовательно с одной из секций индуктора, а вторым выводом подключен ко второй секции индуктора, зашунтированной компенсирующим конденсатором, к выводам которого подключены тиристоры  
 25 катодной группы моста, а тиристоры анодной группы моста подключены к выводам дополнительного компенсирующего конденсатора.

1



Фиг. 1

2



Фиг. 2